吸着材及び吸着建材を用いた室内 VOCs 濃度低減性能試験に関する研究

－トルエン濃度低減効果に影響を及ぼす因子の検討－

STUDY ON INDOOR VOCs CONCENTRATION REDUCTION PERFORMANCE OF THE
ACTIVATED CARBON AND SORPTIVE BUILDING MATERIALS

Evaluation on parameters influencing to the toluene concentration reduction performance

徐 長 厚*, 加藤 信介**, 安宅 勇二***, 千野 聡子****

*Janghoo SEO, Shinsuke KATO, Yuji ATAKA
and Satoko CHINO*

The concentration of VOCs (Volatile Organic Compounds) in rooms depends not only on emission and ventilation rates, but also on sorption by the room surfaces. The use of sorptive building materials on room surfaces seems effective for decreasing VOCs concentrations that have the possibility of affecting human health. In this study, we evaluated the effects of sorptive building materials with respect to decreasing toluene concentrations in air using a small test chamber. Air containing a low concentration of toluene was supplied, and the decrease in toluene concentration was measured at the exhaust. We examined how the toluene concentration, the air exchange rate of the chamber, the loading factor of the sorptive materials, and the convective mass transfer rate influenced the sorptive performance, which was well reproduced experimentally with the CFD simulations.

Keywords: Activated carbon, VOCs, Small test chamber, Sorptive performance test

活性炭、VOCs、小形チャンバー、吸着性能試験

1. 序

近年、化学物質による室内空気汚染が問題化され、室内化学物質の濃度を低減させる方法として、建材自身に濃度低減効果を持たせた吸着建材が用いられている^{文1-8)}。吸着建材を用いた室内空気汚染低減方法は、常時換気や汚染源対策による方法に比べ、特別な設備の運転を必要としない長所があり、簡便かつ有効な手法であると報告されている^{文1)}。著者らは、室内空気汚染物質の一つであるアルデヒド類濃度を低減する目的で、石膏ボードにアルデヒド類と化学反応する吸着剤を添加した化学反応型吸着建材を用いて、アルデヒド類の濃度低減効果について検討を行った^{文1-4)}。また、吸着建材の横並び性能評価をするために、試験建材表面の物質伝達率や試験料負荷率の各種パラメーターがホルムアルデヒド濃度低減効果に及ぼす影響を検討し、現在、これらの吸着建材による濃度低減性能試験法はJIS化されている^{文9-10)}。

一方、吸着材や吸着建材を用いた室内 VOCs (Volatile Organic Compounds: 揮発性有機化合物) 濃度低減性能試験に関する研究の検討は行われているものの、まだ統一された試験法がないなどその事例はあまり多くはない^{文11-13)}。WHO (World Health Organization:

世界保健機関) の分類によると VOCs は、ホルムアルデヒドなどのアルデヒド類とは化学的特性が異なり^{文14)}、ホルムアルデヒド濃度低減試験法として定められた JIS A 1905-1、2 の試験法をそのまま VOCs 濃度低減性能試験に適用可能であるとは言い難い。さらに、既報^{文1、3-4)}のホルムアルデヒド濃度低減性能試験法で用いられた吸着建材は吸着剤を添加した吸着建材が気中ホルムアルデヒドを吸収分解する化学吸着によるものが中心であり、一般的に気中 VOCs 濃度低減用吸着剤として使用する活性炭などのように物理吸着によるものとは吸着特性 (飽和吸着量、吸着等温線など) が異なる^{注1、文15-18)}。

本報では、JIS A 1905-1^{文9)}の試験法を用いて、対象の室内空気汚染物質をホルムアルデヒドの代わりにトルエンとし、VOCs 濃度低減性能試験を行い、VOCs 濃度低減性能試験に対する JIS A 1905-1 試験法の適用可能性を検討する^{注2)}。JIS A 1905-1 に準じ、試験体表面の気流コントロールが可能な物質伝達率制御型小形チャンバー (Boundary Layer Type Small Test Chamber: 以下 BLTSTC)^{注3、文19)}と小形チャンバー法として汎用的に使用されている 20L 小形チャンバー ADPAC (以下、ADPAC)^{文20)}を用いて実験及び数値解析

* 東京大学大学院 博士課程
(学術振興会特別研究員)

** 東京大学生産技術研究所 教授・工博

*** 吉野石膏(株) 博士(工学)

**** 吉野石膏(株) 工修
(東大生研民間等共同研究員)

Graduate Student, The University of Tokyo
(JSPS Research Fellow)

Prof., Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Dr. Eng.

Yoshino Gypsum Co., Ltd., Ph. D.

Yoshino Gypsum Co., Ltd., M. Eng.

(CFD 解析) により、VOCs 濃度低減性能を評価する。また、VOCs 吸着性能に影響を及ぼすと思われる影響因子の検討を行い、異なる二つのチャンバー (BLTSTC 及び ADPAC) を用いた吸着建材の室内 VOCs 吸着性能に関する横並び性能評価を行い、その結果を報告する。

2. VOCs 濃度低減性能試験における吸着速度の評価

実験は、既報^{文1)}のホルムアルデヒド濃度低減性能試験と同様に、試験建材を設置したチャンバーに所定濃度のトルエンを含む空気を供給し、チャンバーの出入口の濃度差から試験建材の吸着速度を算出する定常法で行う。吸着速度 ads は、チャンバーでの出入口濃度差 ($C_i - C_o$) とチャンバー換気量 Q 及び試験建材面積 A より式(1)のように算出される。

$$ads = (C_i - C_o) \cdot Q / A \quad (1)$$

また、吸着建材の汚染濃度低減効果を換気量換算値 Q_{ads} で表すと、式(3)となる^{注4、文1)}。

$$Q_{ads} = (C_i / C_o - 1) \cdot Q / A \quad (2)$$

ここで、 ads は吸着建材の単位時間、単位面積あたりの化学物質吸着速度 [$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]、 C_i はチャンバー入口濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]、 C_o はチャンバー出口濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]、 Q はチャンバーの換気量 [m^3/h]、 A は試験建材の表面積 [m^2]、 Q_{ads} は換気量換算値 [$\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$] である。

3. 実験概要

本 VOCs 濃度低減性能試験では、BLTSTC と ADPAC の二つのチャンバーを用いた。BLTSTC は inner チャンバーと outer チャンバーより構成されている。inner チャンバーにはファンが設けられ、試験建材表面の気流を一定に制御できる。試験建材設置面積は (0.3×0.5) m^2 である。一方、ADPAC の中には試験建材が設置可能なシールボックスが二つあり、試験建材設置面積は (0.147×0.147) m^2 である。BLTSTC と ADPAC の詳細は参考文献 19、20 を参照とする。BLTSTC、ADPAC 及び VOCs 濃度低減性能試験システムの一連を図 1~4 に、活性炭の設置場所のトレー (BLTSTC) 及びシールボックス (ADPAC) の詳細を図 5 に示す。

3.1 測定試料及び条件

表 1 に測定試料及び測定条件を示す。VOCs 濃度低減性能試験に用いた測定試料は、空気中のガス状の有機化合物の除去に有効であると報告されている活性炭^{注5、文16~17、21)}、活性炭を一定量配合した活性炭配合石膏ボード^{注6)}及び吸着建材として流通されている多孔質調湿セラミックス建材であり、比較建材として通常の石膏ボードを用いた。チャンバー内に設置する活性炭は測定前に 100 $^{\circ}\text{C}$ の一定温度を保つ高温乾燥機中で 3 時間以上十分乾燥させる。乾燥後、活性炭は速やかに図 5 に示すチャンバーのトレーとシールボックスに充填して実験を行う。活性炭配合石膏ボード及び通常の石膏ボードの厚さは 12.5 mm、多孔質調湿セラミックス建材は 6 mm である。

吸着材及び吸着建材に対する VOCs 濃度低減性能に影響を及ぼす因子として、供給トルエン濃度^{注7)}、換気回数、試料負荷率、物質伝達率及び相対湿度をパラメーターとして検討した。活性炭の場合、活性炭の使用量 (充填量) が VOCs 濃度低減性能に影響を与えと思われるため、活性炭の面密度^{注8)}に影響因子として考慮した。全ての実験は温度 28 $^{\circ}\text{C}$ で行う。BLTSTC を用いた VOCs 濃度低減性能

図 1 物質伝達率制御型小形チャンバー:400L

図 2 小形チャンバーADPAC: 20L

図 3 物質伝達率制御型小形チャンバーによる VOCs 濃度低減性能試験システム

図 4 小形チャンバーADPAC による VOCs 濃度低減性能試験システム

図 5 活性炭を設置するトレー及びシールボックスの詳細

表 1 実験及び CFD 解析ケース

ケース	チャンパー	測定 試料※	供給トルエン 濃度[μg/m ³]	換気回数 n [h ⁻¹]	試料負荷率 L [m ² /m ³]	Q/A [m/h]	物質伝達率 α_m [m/h]	面密度※※ [kg/m ²]	相対湿度 [%]	CFD 解析
1	BLTSTC	AC	260	0.50	0.38	1.3	15.5	0.93	50	○
2			1300	0.50	0.38	1.3	15.5	0.93	50	○
3			260	0.08	0.38	0.22	15.5	0.93	50	-
4			260	0.50	0.19	2.7	15.5	0.93	50	-
5			260	0.50	0.38	1.3	9.2	0.93	50	-
6			260	0.50	0.38	1.3	15.5	0.93	75	-
7		GBMAC	260	0.08	0.38	0.22	15.5	5.28	50	-
8		HPC	260	0.08	0.38	0.22	15.5	9.29	50	-
9		GB	260	0.08	0.38	0.22	15.5	5.28	50	-
10	ADPAC	AC	260	0.50	2.2	0.23	3.9	2.31	50	○
11			260	0.50	2.2	0.23	3.9	1.16	50	-
12			260	1.00	2.2	0.46	-	2.31	50	○

※AC: 活性炭、GBMAC: 活性炭配合石膏ボード、HPC: 多孔質調湿セラミック建材、GB: 石膏ボード

※※GBMAC、HPC 及び GB の面密度は面積 1m²あたり重量を表す^{注12)}。

1) ケース 1~6 の試験体面積は 0.15m²、活性炭設置トレーの容積は(0.5×0.3×0.002) m³である。

2) ケース 10~12 の試験体面積は 0.022m²、活性炭設置シールボックスの容積は(0.165×0.165×0.03) m³である。

3) ケース 12 では、シールボックス二つの内、片方のみ活性炭を充填する。

試験の場合、供給トルエン濃度は厚生労働省指針値の 260 μg/m³

(基本ケース)、その 5 倍の 1260 μg/m³とし、VOCs 濃度低減性能の濃度依存性を検討する。朱ら、舟木らは、チャンパー法で建材などから放散する化学物質放散量が換気回数や試料負荷率の影響を大きく受けると報告した^{文22-23)}。また、試験建材の表面の気流性状がホルムアルデヒドを対象とする場合、濃度低減性能に影響を与える^{文24)}。さらに、活性炭のように気中濃度が低くても平衡吸着量が大きくて、内部拡散が速やかな吸着材の吸着性能は、試験建材表面における物質伝達性状により律速される^{文1)}。以上より、VOCs 濃度低減性能試験でも換気回数及び試料負荷率による影響を検討する必要がある。そこで、本報では、換気回数は 0.50 h⁻¹ ($Q/A=1.3$ m/h) 及び 0.08 h⁻¹ ($Q/A=0.22$ m/h)^{注9)}、試料負荷率は 0.38 m²/m³ ($A=(0.3 \times 0.5)$ m²) 及び 0.19 m²/m³ ($A=(0.3 \times 0.25)$ m²)、物質伝達率は 9.2 m/h (inner チャンパー平均風速: 0.06 m/s) 及び 15.5 m/h (inner チャンパー平均風速: 0.10 m/s)^{文19)}とし、各影響因子が VOCs 濃度低減性能に及ぼす影響を検討する。相対湿度は 50%と 75%と設定し、VOCs 濃度低減性能の湿度依存性を検討する。活性炭の面密度は 0.93 kg/m²^{注10)}する。ADPAC を用いた VOCs 濃度低減性能試験では、温度 28℃、相対湿度 50%、供給トルエン濃度 260 μg/m³、試料負荷率は 2.2 m²/m³、物質伝達率 3.9 m/h^{文25)}で実験を行う。換気回数は 0.50 h⁻¹ ($Q/A=0.23$ m/h) 及び 0.10 h⁻¹ ($Q/A=0.46$ m/h)、活性炭の面密度は 2.31 kg/m²及び 1.16 kg/m²とし^{注11)}、換気量と吸着材の活性炭の厚みが VOCs 濃度低減性能に及ぼす影響を検討する。

3.2 実験及び分析方法

BLTSTC及びADPAC内に試験建材(吸着建材または比較建材)を設置する。表1の条件で所定濃度のトルエンをチャンパーに供給し、定常状態(チャンパーの出入口での濃度差が一定となる状態)になるまで、チャンパーの出入口濃度を測定する。定常状態を確認した上、トルエンの供給を停止し、清浄空気のみ供給することで試験建材に吸着したトルエンの再放散を確認する試験を行う。供給トルエン濃度は、トルエン標準ガス(20 ppm / N₂ベース)を所定の濃度に清浄空気で希釈調整し、試験建材を設置したBLTSTC及びADPACに供給する。図3及び4に示すようにチャンパーの出入口でTenax-TAを用いて空気を捕集^{注13)}し、GC/MS-TDS (Gas

表 2 CFD 解析条件 (ADPAC)

乱流モデル	低 Re 数型 k - ϵ モデル (Abe-Nagano model)
メッシュ分割	670,000
差分スキーム	移流項: 2 次精度風上
流入境界	$U_{x,in}=7.2 \times 10^{-2}$ 、 14.4×10^{-2} m/s、 $U_{y,in}=0$ 、 $U_{z,in}=0$ $k_{in}=3/2 \cdot (U_{in} \times 0.05)^2$ 、 $\epsilon_{in}=C_{\mu} \cdot k_{in}^{3/2}/L_{in}$ $L_{in}=1/7L_o$ 、 $L_o=7.0 \times 10^{-4}$ m
流出境界	U_{out} =(質量保存による) k_{out} 、 ϵ_{out} = free slip
壁面境界	No-slip
3 次元の対称性を考慮し、Y 方向は 1/2 の領域で解析する。流れ場の解析後、シールボックスの建材設置位置に表面濃度 $C_s=0$ を与え、拡散場解析を行う。	

Chromatography/Mass Spectrometer-Thermal Desorption System) により化学物質の定性・定量分析を行う。試験の前に測定したトルエンのバックグラウンド濃度は1μg/m³以下で、トルエンに対するチャンパー回収率は96%であった^{文11、20)}。コンディショニング後のTenax-TAに1ngの標準トルエンを添加したTenax-TAの5本を用意し、GC/MS-TDS分析により、5回分の標準偏差σを算出した^{文20)}。その結果、GC/MSのトルエンに対する定量下限(10σ、σ: 標準偏差)及び検出下限(3σ、σ: 標準偏差)は、0.72μg/m³及び0.22μg/m³であった。

4. 数値解析概要

4.1 流れ場解析

流れ場の解析ケースを表 1 に示す。BLTSTC を用いた VOCs 濃度低減性能試験では、outer チャンパーに対する換気回数は 0.50 h⁻¹、inner チャンパー内の平均風速は 0.10 m/s (物質伝達率 15.5 m/h) として解析を行う。解析条件の詳細は参考文献 19 を参照とする。ADPAC を用いた VOCs 濃度低減性能試験では、実験と同様に換気回数を 0.50 h⁻¹ 及び 0.10 h⁻¹ とし、解析を行う。流れ場の解析は、低 Re 数型 k - ϵ モデル (Abe-Nagano model)^{文26)}に基づき、3 次元解析を行う。表 2 に ADPAC に対する解析条件を示す。

4.2 拡散場解析

流れ場の解析後、試験建材設置面に吸着の境界条件を与え、拡散及び化学物質吸着の解析を行う。BLTSTC の場合、試験建材表面積

表 3 BLTSTC によるトルエン濃度低減性能試験結果（定常状態）

ケース	1		2		3	4	5	6	7	8	9
実験/CFD	実験	CFD	実験	CFD	実験	実験	実験	実験	実験	実験	実験
測定試料	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	GBMAC	HPC	GB
相対湿度 [%]	50	-	50	-	50	50	50	75	50	50	50
試験期間 [日]	7/14	-	7	-	7	7	7	14	7	7	7
換気回数 n [h^{-1}]	0.50	0.50	0.50	0.50	0.08	0.50	0.50	0.50	0.08	0.08	0.08
試料負荷率 L [m^2/m^3]	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.19	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38
Q/A [m/h]	1.3	1.3	1.3	1.3	0.21	2.6	1.3	1.3	0.22	0.22	0.22
物質伝達率 α_m [m/h]	15.5	15.5	15.5	15.5	15.5	15.5	9.2	15.5	15.5	15.5	15.5
面密度* [kg/m^2]	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	5.28	9.29	5.28
トルエン入口濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	280/260	260	1260	1300	250	310	270	310	300	308	290
トルエン出口濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	106/98	81	504	393	41	118	122	116	149	273	270
吸着速度 ads [$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]	229/213	236	995	1193	44	505	195	255	32	7	4
換気量換算値 Q_{ads} [$\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$]	2.2/2.2	2.9	2.0	3.0	1.1	4.3	1.6	2.2	0.2	0	0
試験期間中のトルエン 積算吸着量 [$\mu\text{g}/\text{m}^2$] ($\mu\text{g}/\text{g}$)	38472/71568 (41)/(77)	-	167160 (180)	-	7392 (8)	84840 (91)	32760 (35)	85680 (92)	5376 (1)	1176 (1<)	672 (1<)

を $0.5 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ （試料負荷率 $L=0.38 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 、 $Q/A=1.3 \text{ m}/\text{h}$ ）とし、実験のケース 1 の VOCs 濃度低減性能試験結果との比較検証を行う。また、供給トルエン濃度を $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と $1300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ とし、VOCs 濃度低減性能の濃度依存性を数値解析で検証する。ADPAC では、実験ケース 10、12 に対応するように試験建材面積を $0.147 \text{ m} \times 0.147 \text{ m} \times 2$ （試料負荷率 $L=2.2 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ）とし、濃度低減性能を検討する。吸着材の活性炭は、汚染物質の発生量に対して十分に大量にあると仮定し、活性炭の吸着面における表面濃度 $C_s=0$ を仮定する。すなわち Henry 型の吸着等温式を仮定した場合の Henry 定数 $k_h=\infty$ との仮定に一致する^{*)}。

気中での化学物質拡散は式（3）に示す拡散方程式を対象とした 3 次元解析を行う。

$$\frac{\partial \bar{C}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_j \bar{C}_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(D_1 + \frac{\nu_i}{\sigma_i} \right) \cdot \frac{\partial \bar{C}_i}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

ここで、 $\bar{C}_i$ は空間のある点におけるトルエン濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]、 D_1 は分子拡散係数 [m^2/s]、 $\bar{U}_j$ は風速 [m/s]、 ν_i は渦動粘性係数 [m^2/s]、 σ_i は乱流 Schmidt 数 [-] を示す。

28°C でのトルエンの空気中の物質拡散係数 D_1 は、 $8.03 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ を与えた^{*)27)}。

5. 実験結果

各チャンバーを用いた吸着材・吸着建材の VOCs 濃度低減性能試験の結果を表 3~4 及び図 6~8 に示す。

5.1 BLTSTC における濃度低減性能試験

ケース 1 ($n=0.5 \text{ h}^{-1}$ 、 $L=0.38 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 、 $\alpha_m=15.5 \text{ m}/\text{h}$) の実験開始 7 日後、供給トルエン濃度 $280 \mu\text{g}/\text{m}^3$ に対し、チャンバー出口濃度は $106 \mu\text{g}/\text{m}^3$ となり、本研究で用いた活性炭のトルエン濃度低減効果が確認できた（表 3）。実験開始 14 日後の供給トルエン濃度及び出口濃度は、 $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 及び $98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ となった。実験開始後 14 日までの活性炭の換気量換算値 Q_{ads} は $2.2 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ で一定となり、経過日数による活性炭のトルエンに対する濃度低減効果は変わらなかった。トルエン再放散試験では、図 6 に示すように活性炭に吸着され

表 4 ADPAC によるトルエン濃度低減性能試験結果（定常状態）

ケース	10		11	12	
実験/CFD	実験	CFD	実験	実験	CFD
測定試料	AC	AC	AC	AC	AC
相対湿度 [%]	50	50	50	50	50
試験期間 [日]	7	-	7	7	7
換気回数 n [h^{-1}]	0.50	0.50	0.50	1.00	1.00
試料負荷率 L [m^2/m^3]	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
Q/A [m/h]	0.23	0.23	0.23	0.46	0.46
物質伝達率 α_m [m/h]	3.9	3.9	3.9	-	-
面密度 [kg/m^2]	2.31	-	1.16	2.31	-
トルエン入口濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	270	260	270	250	260
トルエン出口濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	36	29	69	49	46
吸着速度 ads [$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]	53	53	46	92	98
換気量換算値 Q_{ads} [$\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$]	1.5	1.8	0.7	1.9	2.1
試験期間中のトルエン 積算吸着量 [$\mu\text{g}/\text{m}^2$] ($\mu\text{g}/\text{g}$)	8904(4)	-	7728(7)	15288(7)	-

たトルエンの再放散は見られなかった。

供給トルエン濃度をケース 1 の約 5 倍の $1260 \mu\text{g}/\text{m}^3$ としたケース 2 では、出口濃度が $504 \mu\text{g}/\text{m}^3$ で、活性炭のトルエンに対する換気量換算値 Q_{ads} は $2.0 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ であった。ケース 2 は、ケース 1 とトルエン濃度が異なるため、入口のトルエン濃度の変化に対応し、ケース 2 の出口濃度と吸着速度 ads も変化した。しかし、両ケースの換気量換算値 Q_{ads} はほぼ同じ値となった（表 3、図 7）。これは、今回実験を行ったトルエンの濃度範囲（ $260 \sim 1300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）であれば、本研究で用いた活性炭のトルエンに対する濃度低減性能がトルエン濃度に依存しないことを意味する。

ケース 1 の換気回数 n の 0.50 h^{-1} ($Q/A=1.3 \text{ m}/\text{h}$) を $1/6$ とし、換気回数 n を 0.08 h^{-1} ($Q/A=0.21 \text{ m}/\text{h}$) と設定したケース 3 の場合、吸着速度 ads は $44 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、換気量換算値 Q_{ads} は $1.1 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ となった。また、試験建材の活性炭の見かけの表面積を $1/2$ ($L=0.19 \text{ m}^2/\text{m}^3$) とし、 $Q/A (=n/L)$ を $2.6 \text{ m}/\text{h}$ と設定したケース 4 では、吸着速度 ads が $505 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、換気量換算値 Q_{ads} が $4.3 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ となった。これより物質伝達率 α_m を $15.5 \text{ m}/\text{h}$ と一定とした条件では、 $Q/A (=n/L)$ の大小が吸着速度 ads 及び換気量換算値 Q_{ads} に影響を与え、本研究の活性炭を用いたトルエン濃度低減性能試験でも濃度低減性能は $Q/A (=n/L)$ に影響されることが確認できた。

物質伝達率 α_m を 15.5 m/h (ケース 1) から 9.2 m/h と制御したケース 5 の場合、吸着速度 ads が $195 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、換気量換算値 Q_{ads} が $1.6 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ となり、ケース 1 (吸着速度 $ads = 229 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、換気量換算値 $Q_{ads} = 2.2 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$) より吸着性能が低下した。トルエン濃度低減性能が建材表面の気流性状により影響を受けることを確認した。

ケース 6 では、活性炭のトルエン濃度低減性能に関する湿度依存性を検討した。チャンパーの出入口の相対湿度は 75% で一定となった。実験開始 14 日後、吸着速度 ads は $255 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、換気量換算値 Q_{ads} は $2.2 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ となった。ケース 1 のトルエン濃度低減性能と同じ性能が見られ、本研究で用いた活性炭のトルエン濃度低減性能に関する湿度依存性は認められなかった。

2 種類の吸着建材と比較建材によるトルエン濃度低減性能に関する結果を表 3 のケース 7~9 に示す。実験条件は、ケース 3 の条件 ($n = 0.08 \text{ h}^{-1}$ 、 $L = 0.38 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 、 $\alpha_m = 15.5 \text{ m/h}$) と同じである。石膏ボードに一定量の活性炭を配合した活性炭配合石膏ボード (ケース 7) 注 6) の吸着速度 ads は $32 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、換気量換算値 Q_{ads} は $0.2 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ となり、ケース 3 の活性炭と比較すると、換気量換算値 Q_{ads} は小さく、吸着性能の低下が見られた (表 3、図 8)。これは、活性炭配合石膏ボードに配合された活性炭とケース 3 の活性炭の種類や配合量が異なることがその原因であると思われる。一方、多孔質調湿セラミック建材の場合 (ケース 8)、比較建材の通常の石膏ボード (ケース 9) とほぼ同じ吸着速度 ads 、換気量換算値 Q_{ads} となり、濃度低減性能を殆ど有していないと判断した (表 3)。また、石膏ボードと多孔質調湿セラミック建材の再放散試験では、吸着したトルエンの再放散を確認した (図 8)。既報¹⁸⁾の吸着建材の吸着持続性能の評価として、活性炭及び活性炭配合石膏ボードに対するトルエンの飽和吸着量を測定した。本研究の実験期間中 (7~14 日: 供給トルエン濃度 $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$) の活性炭及び活性炭配合石膏ボードに対するトルエン積算吸着量は、既報の飽和吸着量よりもはるかに少ないため、これらの吸着建材からトルエンは再放散しなかったと考えられる。

5.2 ADPAC における濃度低減性能試験

ADPAC を用いて濃度低減性能試験を行ったケース 10 ($n = 0.5 \text{ h}^{-1}$ 、 $L = 2.2 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 、 $\alpha_m = 3.9 \text{ m/h}$ 、面密度 = $2.31 \text{ kg}/\text{m}^2$) の場合、供給トルエン濃度 $270 \mu\text{g}/\text{m}^3$ に対し、チャンパー出口濃度は $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ となり、ADPAC を用いた場合も活性炭によるトルエン濃度低減効果が確認できた。

使用活性炭の量をケース 10 (面密度 = $2.31 \text{ kg}/\text{m}^2$) の半分とし、建材 (活性炭) の厚みがトルエン濃度低減性能に及ぼす影響を検討したケース 11 (面密度 = $1.16 \text{ kg}/\text{m}^2$) では、吸着速度 ads が $46 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、換気量換算値 Q_{ads} は $0.7 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ となった。活性炭を建材として考えるならば、ケース 10 (吸着速度 $ads = 53 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、換気量換算値 $Q_{ads} = 1.5 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$) より濃度低減性能が低下したことから、建材の厚みが異なると吸着特性も異なることを示す。つまり、活性炭のように化学物質の内部拡散が速やかな吸着建材を用いて濃度低減性能評価を行う場合、建材の厚みも影響因子として十分検討する必要があると考えられる。

換気回数 n を 1.00 h^{-1} とし、 Q/A を 0.46 m/h と制御したケース 12 では、吸着速度 ads ($92 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$) 及び換気量換算値 Q_{ads} (1.9

図 6 AC の経過日数におけるトルエン濃度
(ケース 1: $C_i = 260 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $n = 0.5 \text{ h}^{-1}$ 、 $L = 0.38 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 、 $\alpha_m = 15.5 \text{ m/h}$)

図 7 AC の経過日数におけるトルエン濃度
(ケース 2: $C_i = 1300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $n = 0.5 \text{ h}^{-1}$ 、 $L = 0.38 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 、 $\alpha_m = 15.5 \text{ m/h}$)

図 8 各試験建材の経過日数におけるトルエン濃度
(ケース 3: AC、ケース 7: GBMAC、ケース 9: GB)
($C_i = 260 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $n = 0.08 \text{ h}^{-1}$ 、 $L = 0.38 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 、 $\alpha_m = 15.5 \text{ m/h}$)

$\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$) が大きくなり、濃度低減性能が Q/A の影響を受けることが確認できた。

6. 数値解析結果

VOCs 濃度低減性能に関する数値解析結果を表 3~4 及び図 9~11 に示す。

6.1 流れ場解析結果

BLTSTC の流れ場解析結果は参考文献 19 を参照とする。

換気回数 $n = 0.50 \text{ h}^{-1}$ とした ADPAC 内の X-Y 断面風速分布及びス

(a) 風速分布図及び拡大図

(b) 建材表面より 1cm 離れた Line A におけるスカラー風速分布

図 9 ADPAC 内の風速分布

カラー風速分布を図 9(a)、(b)に示す。図 9(a)のシャワー管の三つの穴からの吹出風速はそれぞれ①6.9 cm/s、②7.8 cm/s、③7.9 cm/sであり、清浄空気はほぼ均一に上向きに吹出された。吹出された清浄空気は整流用パンチ板を通過後上向きに建材面に沿って流れ、上部排出口から排出される。建材設置面より 1 cm 離れた位置 (Line A) の風速は、約 3×10^{-3} cm/s で、チャンバー底から高さ $h = 7 \sim 21.7$ cm の風速は比較的一定であった (図 9(b))。

6.2 拡散場解析結果

BLTSTC を用いたケース 1、2 の実験に対応する CFD 解析結果を表 3 に示す。ケース 1 の場合、実験結果と同様のトルエン濃度低減効果が CFD 解析によって再現された。ケース 2 で CFD 解析により算出された換気量換算値 Q_{ads} は、実験値の 1.5 倍となり、よりいい性能を有すると示されたが、CFD 解析と実験による吸着性状はほぼ対応していた。また、図 10 に示すように活性炭表面近傍に表面吸着に伴う低濃度の境界層が inner チャンバー測定胴下流に発達し、活性炭がトルエン濃度低減効果を有することが確認できる。

ADPAC を用いたケース 10、12 の実験に対応する CFD 解析結果を表 4 に示す。 $Q/A = 0.23$ m/h のケース 10 及び $Q/A = 0.46$ m/h のケース 12 の CFD 解析は実験結果と良く対応し、トルエン濃度低減効果が確認された^{注 14)}。図 11 のトルエン濃度分布断面図に示すように、ADPAC 内の建材表面付近は、吸着材の効果により非常に低濃度であった。

7. 考察

ケース 1~6 及びケース 10~12 の活性炭を用いた全ての濃度低減性能試験で、活性炭のトルエンに対する濃度低減効果は確認できた。トルエン再放散試験では、活性炭からのトルエンの再放散は見られなかった。これは、活性炭に吸着したトルエンの吸着量が活性炭の

図 10 BLTSTC 内のトルエン濃度分布
(ケース 1 の X-Y 断面、単位[µg/m³])

図 11 ADPAC 内のトルエン濃度分布
(ケース 10 の X-Y 断面、単位[µg/m³])

図 12 経過日数におけるトルエン積算吸着量

表 5 二つのチャンバーによる濃度低減性能評価の比較

ケース	チャンバー	Q/A [m/h]	面密度 [kg/m²]	α_m	ads [µg/(m²·h)]	Q_{ad} [m³/(h·m²)]
3	BLTSTC	0.21	0.93	15.5	44	1.1
10	ADPAC	0.23	2.31	3.9	53	1.5

トルエン飽和吸着量より大幅に少ないためと思われる。活性炭 1g 当たりトルエン飽和吸着量は約 $1.5 \sim 1.7 \times 10^5$ µg/g (トルエン濃度 $260 \sim 1300$ µg/m³) である^{注 5)}が、図 12 に示すように本研究でケース 1~6 及びケース 10~12 の経過日数における活性炭へのトルエン積算吸着量^{注 15)}は 200 µg/g を超えない。これより、活性炭のように非常に優れた化学物質の濃度低減性能を持つ吸着建材であれば、その

効果の持続性は数年以上維持出来ると予想される。また、通常の石膏ボードは、濃度低減効果はあまり見られなかった。さらに、石膏ボードではトルエンの再放散が確認できた。今後、各種吸着建材の濃度低減性能試験のみではなく、吸着性能の持続性の検討も行う必要がある。

化学物質の放散量測定やホルムアルデヒド濃度低減性能試験と同様に、VOCs（トルエン）濃度低減性能にも Q/A （ $= n/L$ ）が濃度低減効果に影響を及ぼす重要な因子であることが分かった。BLTSTC のケース 3 及び ADPAC のケース 12 のように換気量 Q （換気回数 n ）の増減は、供給される汚染物質（吸着質）の吸着材（吸着媒）への接触時間と直接関わっており、濃度低減効果は Q/A （ $= n/L$ ）に大きく左右されると判断した。また、ケース 4 のように試験体の表面積の変化による Q/A （ $= n/L$ ）の変化は濃度低減効果に影響を与えた。これは、吸着建材の面積効果によるものであると思われる^{※ 1)}。化学物質の物理吸着を用いた本試験でも、試験体表面の気流制御による物質伝達率 α_m が濃度低減効果に影響を与えた。これより、各種吸着建材の VOCs（トルエン）濃度低減性能を横並び評価をするためには、ホルムアルデヒド濃度低減性能試験と同様に Q/A （ $= n/L$ ）、物質伝達率 α_m をある範囲内で規定する必要がある。

相対湿度 75% の雰囲気環境では、活性炭の水蒸気吸着量が急激に増加する傾向があると報告されている^{※ 15)}。活性炭は化学物質を物理吸着するものであり、雰囲気環境の水分の影響により、吸着性能が阻害される可能性がある^{※ 28)}。しかしながら、今回の活性炭のトルエン濃度低減性能試験では、活性炭のトルエン吸着能力の湿度依存性は見られなかった。これは、ケース 7 での活性炭に対するトルエンの吸着量（92 $\mu\text{g/g}$ ）が、飽和吸着量（ $1.5 \times 10^5 \mu\text{g/g}$ ）より遥かに下回ったため、水分により活性炭の吸着性能の低下は確認できなかったと思われる。活性炭を用いたトルエンなどの VOCs 濃度低減性能試験で湿度依存性を明らかにするためには、活性炭に同時に吸着する化学物質の量及び水分量をより細かいオーダーまで測定可能な測定法の検討が必要である。

異なる二つのチャンバーを用いて活性炭に対する横並び濃度低減性能評価を行い（ケース 3 とケース 10）、その結果を表 5 に示す。両チャンバーでの Q/A はほぼ同じ（0.21 ~ 0.23 m/h）であったが、ADPAC を用いた方がより良い濃度低減効果が見られた。物質伝達率 α_m は、濃度低減性能に影響を及ぼす影響因子であるが、今回は、ADAPC では、活性炭の面密度が BLTSTC の面密度よりも 2 倍以上大きいこと、濃度低減性能が活性炭の面密度の影響を大きく受けたと思われる。つまり、建材の厚み方向の拡散が横並び性能評価に影響を与えることを示唆する。

8. 結論

本研究では、実験及び数値解析を用いて、VOCs 濃度低減性能試験を行い、VOCs 吸着性能に影響を及ぼす影響因子を検討した。得られた結果を以下にまとめる。

(1) 本研究では、JIS A 1905-1 の試験法に準じ、活性炭など各種吸着建材に対する VOCs 濃度低減性能試験を行い、JIS A 1905-1 の試験法を適用して VOCs の物理吸着による濃度低減性能評価も可能であると判断した。

(2) VOCs 濃度低減性能試験においても、吸着建材の横並び性能評価を行う際、物質伝達率及び Q/A は性能評価の重要な影響因子であることを再確認した。また、活性炭のように内部拡散が速やかな建材は、その厚みが濃度低減性能に影響を与える可能性がある。

(3) 本試験での活性炭及び活性炭配合石膏ボードの VOCs 濃度低減性能は確認できた。活性炭の場合、VOCs 濃度低減性能の濃度・湿度依存性も見られなかったが、湿度依存性については検討の余地が残っている。

(4) 再放散試験では、活性炭からの再放散は見られなかった。これは、活性炭に吸着されたトルエンの吸着量が活性炭のトルエン飽和吸着量より大幅に少ないためと思われる。各種吸着建材のトルエン飽和吸着量を調べる必要があり、今後の検討課題である。

(5) 多くの VOCs 吸着建材の濃度低減性能評価及び VOCs 混合ガスを用いた濃度低減性能評価を行う予定である。

謝辞

本研究は、独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託を受け、財団法人 建材試験センター内に設置された「建材からの VOC 等放散量の評価方法に関する標準化委員会 吸着分解低減化部会 (委員長: 加藤信介 東京大学生産技術研究所教授)」の研究活動の一部として行われている。本研究を行うに際し、(有) アドテック 及び (株) エアグッド には ADPAC SYSTEM を、(株) 三菱化学産資 には試験体の活性炭を提供して戴いた。関係各位に深甚なる謝意を表する次第である。

注

注 1) 例えば、JIS A 1905-1 の対象化学物質のホルムアルデヒドの吸着等温線は、化学吸着の性能を持つ吸着建材により、ホルムアルデヒドの吸着量と濃度との関係が比例、すなわち、1 次式近似で表せる。また、ホルムアルデヒドの濃度が低濃度であれば、物理吸着を用いた竹炭などの吸着建材により、ホルムアルデヒドの吸着量と濃度との関係も 1 次式近似で表せる（参考文献 15）。一方、本研究で用いた吸着材の活性炭によるト

活性炭に対するトルエン吸着等温線: 25°C (参考文献 18)

ルエンの吸着量は、濃度に対し、langmuir 式で表せる（参考文献 16~18）。

注 2) JIS A 1905-1 のホルムアルデヒド濃度低減性能試験法は、濃度低減性能評価や横並び性能評価に関して、その精度や再現性が非常に良く、試験法として有効性があり、本報では、JIS A 1905-1 に準じ、VOCs 濃度低減性能試験法を行い、その有効性を検討する。

注 3) 本研究の BLTSTC は、当初、境界層型小形チャンバー (Boundary Layer Type Small Test Chamber) で呼ばれたが、JIS A 1901 解説（参考文献 20）では物質伝達率制御型小形チャンバーと表記されたため、本文では JIS A 1901 の表現を使う。

注 4) トルエンの濃度が低濃度の場合（例えば、260~1300 $\mu\text{g/m}^3$ ）、活性炭によるトルエンの吸着量と濃度との関係は、1 次式近似と見なせる。すなわち、低濃度のトルエンに関しては、活性炭によるトルエンの吸着量は、濃度に対し、langmuir 式ではなく、henry 式で表現できる。これは、低濃度の範囲のホルムアルデヒドにおいて、竹炭を用いた物理吸着によ

るホルムアルデヒドの吸着量と濃度との関係と同様である（参考文献 15）。
よって、本研究の実験条件では、式(2)から求められる換気量換算値が、
汚染濃度によらず、一定（すなわち、物質伝達率）となると言える。

注 5) 本実験サンプルの活性炭は粒状であり、その仕様を下記の表に示す。
(温度 25℃、相対湿度 0%、1atm)

トルエン濃度	活性炭 1g 当たりトルエン飽和吸着量(μg/g)
260μg/m ³	1.5×10 ⁵
1300μg/m ³	1.7×10 ⁵
充填密度：0.52g/ml、強熱残分：11.4%、 沃素吸着量：1060mg/g、平均粒度：0.35mm である。	

注 6) 活性炭配合石膏ボードで配合された活性炭は、注 4)の粒状活性炭と種類が異なるものであり、活性炭の配合量は製造技術に関わっているため、公開できない。

注 7) 本報の VOCs 濃度低減性能試験の対象化学物質はトルエンとする。

注 8) 面密度[kg/m²]= 試験体表面積 1m²あたり活性炭の重量。

注 9) JIS A 1905-1 に基づき、実験の換気回数は 0.5h⁻¹ が望ましい。しかしながら、ケース 7~9 の GBMAC、HPC 及び GB については、換気回数を 0.08h⁻¹ ($Q/A=0.22\text{m/h}$) とした。これは、最終的に GBMAC、HPC 及び GB に対しても ADPAC で行った実験結果 ($Q/A=0.23\text{m/h}$) と比較するためである。これらの結果については、今後報告する。

注 10) サンプルの活性炭の重量は 0.140kg、表面積は(0.5×0.3)m² である。

注 11) サンプルの活性炭の重量は 0.100kg、表面積は(0.147×0.147)m² 及び 0.050kg、(0.147×0.147)m² である。

注 12) AC の面密度は AC 表面積 1m²あたり AC の重量を表す。GBMAC の面密度の場合、GBMAC の表面積 1m²あたり（活性炭+石膏ボード）の重量を表す。注 4)の理由で、GBMAC に配合された活性炭のみの重量は公開できない。

注 13) BLTSTC での捕集量は 0.15L/min、3L で、ADPAC での捕集量は 0.167L/min、3.2L である。JIS A 1905-1 に準じ、実験開始後 1、3、7、14 日目にチャンバーの空気捕集を行う。空気捕集によるチャンバーに流れる空気の流量及び空気の漏れがないことを確認するため、空気捕集の間の出口流量が、入口流量から空気捕集時の流量を差し引いた流量であることを流量計を用いて確認する。

注 14) BLTSTC より ADPAC の方が実験結果と解析結果の対応が良かった。解析において、BLTSTC (216,600 メッシュ/400L、吸着建材表面の第 1 メッシュの壁座標 y^+ : 0.03) より ADPAC (216,600 メッシュ/400L、吸着建材表面の第 1 メッシュの壁座標 y^+ : 0.003) の方がメッシュによる空間分割が細かく行われ、チャンバー内の流れ場により決まる拡散場の再現性が良かったと思われる。

注 15) トルエン積算吸着量= 吸着速度 ads [μg/(m²・h)] × 実験経過時間 [h] / 面密度[kg/m²]。

参考文献

- 1) 安宅勇二、加藤信介、伊藤一秀、朱 清宇、村上周三: 化学反応型パッシブ吸着建材の濃度低減効果に関する研究—一度低減効果測定法の開発と検証 第 1 報、日本建築学会環境系論文集、No.581、pp. 59-66、2004、7
- 2) 徐 長厚、加藤信介、安宅勇二、朱 清宇: 揮発性有機化合物の放散・吸脱着等のモデリングとその数値予測に関する研究(その 38)、化学反応型パッシブ吸着建材のアセトアルデヒド濃度低減効果に関する実験と CFD 解析、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2、pp. 1073-1074、2004
- 3) 安宅勇二、加藤信介、徐 長厚、朱 清宇: パッシブ吸着建材のホルムアルデヒド放散抑制性能試験の開発、日本建築学会環境系論文集、No.596、pp. 45-52、2005、10
- 4) 安宅勇二、加瀬田郎、横山至、加藤信介、村上周三: 定常法による HCHO 吸収分解せこうボードの濃度低減効果の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2、pp. 875-876、2001
- 5) 関根嘉香、西村厚司: 室内空気中ホルムアルデヒド除去用パッシブ型分解除去ボードの開発、臭気の研究 Vol.30、No.1、pp. 39-47、1999
- 6) 柴野一則、萩原秀彦、小川游: 室内空気汚染対策に関する研究（第 1 報）、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2、pp. 869-870、2001
- 7) 鈴木昭人、川合秀治、田辺新一: 多孔質セラミックス調湿建材に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2、pp. 995-996、2002

- 8) 下之園孝、大河原忠義、半田晋也、和久井健洋、堀 雅宏: グラフト重合高分子塗膜剤を用いる室内環境中ホルムアルデヒド低減方法の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2、pp. 975-976、2003
- 9) JIS A 1905-1、小形チャンバー法による室内空気汚染濃度低減材の低減性能試験法—第 1 部: 一定ホルムアルデヒド濃度供給法による吸着速度測定、(財)建材試験センター、2007
- 10) JIS A 1905-2、小形チャンバー法による室内空気汚染濃度低減材の低減性能試験法—第 2 部: ホルムアルデヒド放散建材を用いた吸着速度測定、(財)建材試験センター、2007
- 11) 徐 長厚、加藤 信介、安宅 勇二: 室内空気汚染濃度低減材の VOCs 濃度低減性能試験に関する研究(その 1)、小形 Test Chamber 法における活性炭・吸着建材の Toluene 濃度低減性能試験、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2、pp. 865-868、2005
- 12) 徐 長厚、加藤 信介、安宅 勇二、長尾聡子: 室内空気汚染濃度低減材の VOCs 濃度低減性能試験に関する研究(その 2)、吸着材・吸着建材の Toluene 濃度低減性能試験及びその影響因子の検討、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp. 825-828、2005
- 13) 下之園孝、大河原忠義、半田晋也、堀雅弘: グラフト重合高分子吸着材を用いる VOC の除去と放散制御、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2、pp. 1071-1072、2004
- 14) World Health Organization “Indoor Air Quality: Organic Pollutants”, WHO regional office for Europe (EURO Report and Studies I111), Copenhagen、1989
- 15) 安宅 勇二、加藤 信介、徐 長厚、朱 清宇、長谷川 あゆみ: 各種建築材料および吸着剤の水蒸気およびホルムアルデヒド吸着等温線の測定、日本建築学会環境系論文集、No.595、pp. 49-56、2005
- 16) 近藤精一、石川達雄、安部郁夫: 吸着の科学、第 2 版、丸善、2001
- 17) 竹内 節: 吸着の化学—表面・界面制御のキーテクノロジー、産業図書、2000
- 18) 徐 長厚、加藤信介、安宅勇二、千野聡子: 各種吸着建材を用いた室内 VOCs 濃度低減性能試験及び吸着持続性能の検討、第 25 回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集、pp. 216-219、2007
- 19) 朱 清宇、加藤信介、村上周三、伊藤一秀: 境界層型小型 Test Chamber の開発と試験建材表面の化学物質伝達率に関する実験と CFD 解析、日本建築学会計画系論文集、No.549、pp. 45-50、2001
- 20) シックハウス対策に役立つ小形チャンバー法解説-JIS A 1901、財団法人日本規格協会、2003
- 21) JIS-K 1474: 活性炭試験方法、1991
- 22) 朱 清宇、加藤信介、安宅勇二: テストチャンバー実験及び CFD 解析による Medium Density Fiberboard における物質伝達率が放散速度に与える影響の検討—ホルムアルデヒド放散量測定用テストチャンバー法に関する研究一、日本建築学会環境系論文集、No.582、pp. 67-74、2004
- 23) 舟木理香、田辺新一、田中 博: 建材からのアルデヒド類・VOC 放散速度測定用小型チャンバーの性能試験及び異なるチャンパー間におけるホルムアルデヒド放散量の比較、日本建築学会環境系論文集、No.572、pp. 47-54、2003
- 24) 安宅勇二、加藤信介、徐 長厚、藤本哲夫: パッシブ吸着建材の濃度低減性能試験法に関する研究—テストチャンパーの物質伝達率の影響の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2、pp. 863-864、2005
- 25) 村上周三、加藤信介、朱清宇、田辺新一、伊藤一秀: 揮発性有機化合物の放散・吸脱着等のモデリングとその数値予測に関する研究 (その 27)—小型チャンパー ADPAC 内の物質放散性状に関する CFD 解析、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2、pp. 811-812、2001
- 26) K. Abe, T. Kondoh, and Y. Nagano, A new turbulence model for predicting fluid flow and heat transfer in separating and reattaching flows. Flow field calculations. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 37, No. 1, pp. 139-151, 1994
- 27) 化学工学便覧 (改正六版): 財団法人 化学工学会、丸善、2001
- 28) Mark P. Cal, Mark J. Rood and Susan M. Larson: Removal of VOCs from humidified gas streams using activated carbon cloth, Separation & Purification, Volume 10, Issue 2, pp. 117-121, 1996

(2007 年 9 月 5 日原稿受理、2008 年 2 月 25 日採用決定)